

Evaluación de las mediciones de lluvia en la Ciudad de México utilizando la red de disdrómetros y su comparación con respecto a la red de pluviómetros de balancín

Assessing the rainfall measurements across Mexico City using disdrometer network and their comparison respect to tipping bucket rain gauge network

Alejandra Amaro-Loza^{a1*}, Adrián Pedrozo-Acuña^b, Alejandro Sánchez-Huerta^{a2}, Carlos Sánchez-Vargas^{a3} y Erik A. Vergara-Alcaraz^{a4}

^aInstituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Edificio 17 Circuito Escolar 04360, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México.

^bInstituto Mexicano de Tecnología del Agua, Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Morelos, México.

E-mail: ^{a1}amaro.aloza@gmail.com, ^{b1}adrian_pedrozo@tlaloc.imta.mx, ^{a2}asanchezh@ii.unam.mx, ^{a3}csanchezv@ii.unam.mx, ^{a4}evergara@ii.unam.mx

*Autor para correspondencia

Recibido: 03/03/2022

Aceptado: 20/04/2022

Publicado: 30/04/2022

Citar como: Amaro-Loza, A, Pedrozo-Acuña, A., Sánchez-Huerta, A., Sánchez-Vargas, C., Vergara-Alcaraz, E.A. 2022. Assessing the rainfall measurements across Mexico City using disdrometer network and their comparison respect to tipping bucket rain gauge network. *Ingeniería del agua*, 26(2), 91-105. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17217>

RESUMEN

Este trabajo representa una contribución para evaluación de las condiciones de las redes de observación de la precipitación en un área urbana, a partir de la comparación entre una red de sensores de disdrómetros ópticos láser (DOL) y una red de pluviómetros de balancín (PB) en la Ciudad de México. En la metodología se seleccionaron 9 estaciones DOL y 16 estaciones PB, las cuales se compararon de dos formas: primero, a partir de la acumulación total de precipitación durante tres años y segundo, por eventos de tormenta. Los resultados indican, que el análisis por eventos de tormenta es más representativo que comparando la precipitación acumulada. Las mediciones son aceptables, ya que estas se comprobaron a partir de correlaciones lineales. Asimismo, se determinó que el número de eventos y la distancia entre las estaciones contribuyen en la correlación de las mediciones. Es deseable que la metodología se aplique en el control de calidad periódico de las mediciones (calibración) y sea parte de las buenas prácticas para la medición del ciclo hidrológico urbano a escala local.

Palabras clave | red pluviométrica, sensores, pluviómetro de balancín, disdrómetro, medición de lluvia, observaciones, hidrología urbana.

ABSTRACT

This work represents a contribution to the evaluation of the conditions of precipitation observation networks in an urban area, based on the comparison between a network of laser optical disdrometer (LOD) sensors and a network of tipping bucket rain gauges (TB) in Mexico City. In the methodology, 9 LOD stations and 16 TB stations were selected, which were compared in two ways: first, from the total accumulation of precipitation over three years and second, by storm events. The results indicate that the analysis by storm events is more representative than comparing the accumulated precipitation. The measurements are acceptable, as these were checked from linear correlations. It was also determined that the number of events and the distance between the stations contribute to the correlation of the measurements. It is desirable that the methodology can be applied in the periodic quality control of measurements (calibration) and be part of the good practices for the measurement of the urban hydrological cycle at the local level.

Key words | rain gauge network, sensors, tipping bucket rain gauge, disdrometer, rainfall data measurements, observations, urban hydrology.

INTRODUCCIÓN

La precisión en la medición de la precipitación es de suma importancia para cualquier análisis hidrológico, tanto para el pronóstico de inundaciones en tiempo real, como para la calibración y validación de modelos hidrológicos (Behrangi et al., 2011; McMillan et al., 2011). Mejorar el proceso de recopilación de datos de precipitación y la incertidumbre asociada a la medición, son tareas fundamentales para la evaluación de futuros escenarios (UNESCO, 2015).

Una red de medición se define, según Langbein (1965), “Como un sistema organizado que recolecta una clase específica de observaciones, de modo que, cada estación registra de forma puntual o regional en intervalos de tiempo o espacio”. La mayoría de las estaciones pluviométricas, utilizadas para fines hidrológicos, son insuficientes e inadecuadas para la estimación y predicción en la disponibilidad de recursos hidráulicos. Desafortunadamente, en el diseño de las redes pluviométricas influyen factores no hidrológicos, como la funcionalidad y el costo.

Se desconoce la cifra exacta de estaciones pluviométricas existentes, debido a la divergencia de criterios para su consideración. Algunas estadísticas admiten estaciones que han proporcionado mediciones hasta cierto periodo, en otros casos la disponibilidad de datos se ha restringido para los sectores público y de investigación, o solo están disponibles para algunas escalas temporales (Kidd et al., 2017). A nivel mundial, la institución que establece las referencias de los instrumentos para la medición de la precipitación es la Organización Mundial de Meteorología (OMM, 2017), de acuerdo con la OMM se han cuantificado entre 8000 y 12000 estaciones de “primera clase” (WMO, 2011), las cuales corresponden a observaciones sinópticas en superficie (SYNOP), con registros cada 3 horas o en tiempo real. Asimismo, el Centro de Climatología de Precipitaciones Globales (GPCC por sus siglas en inglés) dispone registros de precipitación generados a partir de datos de estaciones in situ que pasaron por un proceso de control de calidad, su base de datos incluye más de 200 años de registros de precipitación con alrededor de 85000 estaciones en todo el mundo (Sun et al., 2018). La disponibilidad de mediciones de precipitación en tiempo real, con sensores de alta resolución temporal (1 minuto), comenzó a utilizarse en algunos países entre unos 20 y 30 años.

La variación de la resolución temporal en las estaciones pluviométricas está en función de los objetivos de la gestión de las redes y de la tecnología propia de los sensores (Morbidelli et al., 2017). El estudio de inundaciones súbitas requiere de datos con escalas de tiempo y espacio de alta resolución y baja latencia (tiempo de transmisión) para que sea realmente útil, mientras que, en la aplicación climática, como en estudios de sequías, será suficiente contar con un largo registro histórico, con requisitos espaciales, temporales y de latencia menos estrictos (Kidd et al., 2017). A escala climatológica se requieren redes menos densas, aunque éstas no permitan determinar de manera fiel los eventos extremos o la variabilidad en terrenos complejos. Desde el punto de vista hidrológico, es recomendable que las redes cumplan con: una densidad y distribución adecuada de estaciones, revisión periódica de los datos de cada estación y comparación del equipo, así como de las técnicas de recolección de datos (Moss et al., 1982).

La normatividad mexicana (NMX-AA-116/2-SCFI-2015, 2015) establece las especificaciones técnicas para la ubicación y medición de estaciones meteorológicas y automáticas. En esta norma se señala que, para asegurar la representatividad de la red de estaciones sinópticas, se requiere que su instalación sea en un radio de 100 kilómetros, en el caso de escalas pequeñas se deberá considerar una estación dentro de un radio de 10 km o menos.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), dependencia del Gobierno Federal de México cuya responsabilidad es regular los principios para la gestión de recursos hídricos, tiene a su cargo estaciones climatológicas que son operadas manualmente. De las estaciones climatológicas ubicadas en la Ciudad de México (CDMX), se encuentran actualmente en operación 16 de un total de 62, con registros hasta el 2010. Por otro lado, en el caso de las estaciones meteorológicas automáticas, conocidas coloquialmente como EMAS, sólo operan 4 en la CDMX (CONAGUA, 2021).

Paradójicamente, la Ciudad de México enfrenta dos problemas relacionados con el agua: las inundaciones y la escasez (CONAGUA, 2021; Espínola, 2016; Perló-Cohen y Zamora-Saenz, 2019; SACMEX, 2012). Esta situación ha propiciado una extensa observación de la precipitación por parte de diferentes redes de medición: CONAGUA (Gobierno Federal), SACMEX (Gobierno Local) y OH-UNAM (investigación científica), con un total de 149 estaciones distribuidas en 1485 kilómetros cuadrados, lo que equivale a una densidad de una estación por cada diez kilómetros cuadrados. Esta diversidad sugiere preguntarnos si en todos los casos se está midiendo correctamente. El objetivo central de este trabajo es aportar una referencia para la evaluación

de la precisión de las dos redes de medición de precipitación más importantes de la urbe más grande de México, de modo que su aplicación en los estudios y proyectos sea confiable y de calidad.

Existen varias publicaciones en las que se evalúa el desempeño del pluviómetro de balancín, sin embargo, se han realizado pocas comparaciones entre el disdrómetro óptico láser y el pluviómetro de balancín, incluso en México no existe otra red de disdrómetros ópticos láser. Otro aspecto clave es la limitada literatura disponible sobre datos temporales, a mediano y largo plazo, recolectados de diferentes fuentes de medición de lluvia *in situ*. Cabe señalar que, en este estudio, se han utilizado datos en un periodo de 3 años.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El área de estudio es la Ciudad de México, que forma parte del Valle de México, una región lacustre rodeada de montañas y volcanes con pendientes pronunciadas y un amplio valle. Es uno de los asentamientos urbanos más grandes del mundo, debido a las actividades humanas, se han visto modificadas las condiciones meteorológicas y climatológicas de la zona. Su crecimiento acelerado ha dado paso al calentamiento excesivo de la superficie terrestre (efecto isla de calor urbana), aumentando la actividad de precipitación convectiva (Jauregui, 1995, 1997; Oke et al., 1992).

El promedio anual de precipitación de la Ciudad de México es entre 500 a 1000 mm (Deltares, 2016). El panel izquierdo de la Figura 1 muestra una distribución variable de la precipitación, en la región este es menos de 600 mm, mientras que hacia el occidente aumenta a 1000 mm por un año. El promedio anual más alto de precipitación se ubica en la región suroeste, al pie de la montaña. La precipitación diaria muestra una tendencia ascendente en la tarde. La mayor probabilidad de ocurrencia de tormentas severas (>20 mm/h) se presenta después de las 16:00 hora local (Magana et al., 2003).

Como se aprecia en el panel derecho de la Figura 1, en la Ciudad de México se identifican dos estaciones en términos climatológicos; la temporada seca, entre diciembre y febrero, con promedios diarios de 1 a 5 milímetros de lluvia, y durante el verano (mayo-octubre), la temporada de lluvias, con un pico de precipitación de julio a agosto, que supera los 100 milímetros mensuales. Durante el día la superficie se calienta, provocando tormentas eléctricas por la tarde y noche.

En la Zona Metropolitana del Valle de México, originalmente una cuenca endorreica, se opera una compleja red de drenaje, cuya estructura consta de cuatro desagües artificiales, además de una red combinada de drenaje primario para la conducción

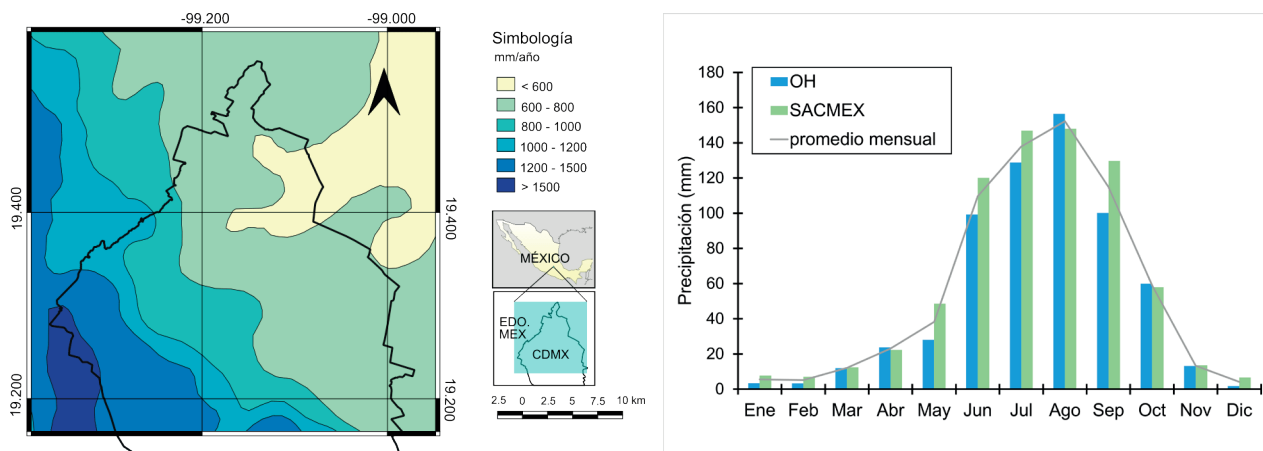


Figura 1 | Panel izquierdo: Mapa de isoyetas media anual de la Zona Metropolitana del Valle de México (CONABIO, 2021). Panel derecho: Precipitación mensual en la Ciudad de México en el periodo 2017 a 2019.

de aguas residuales y pluviales a través de colectores, y una red secundaria formada por sistemas de drenaje domiciliarios. Se ha detectado que las inundaciones por lluvia en la Ciudad de México se generan por la saturación de los sistemas de drenaje a partir de una acumulación de precipitación de 20 milímetros. Con base en este parámetro, sólo los eventos de lluvia con acumulación mayor a 20 mm se han considerado como eventos extremos, debido a la mayor probabilidad de causar una inundación pluvial. Este umbral no tiene un significado físico, corresponde más bien al criterio de los operadores de la infraestructura hidráulica (SACMEX, 2012).

Redes de monitoreo de la precipitación

Pese a que la Ciudad de México contaba con una amplia cobertura de estaciones pluviométricas de tipo convencional, en el Observatorio Hidrológico de la Universidad Nacional Autónoma de México (OH-UNAM) se planteó la necesidad de mejorar la medición del ciclo hidrológico urbano. A partir de 2015, el OH-UNAM puso en marcha el primer sistema de monitoreo de la lluvia en tiempo real, con sensores de alta resolución temporal a través de las TIC'S, que permiten la gestión y toma de decisiones para minimizar los daños por inundaciones (Pedrozo-Acuña, 2017).

Como se muestra en la Figura 2, cada una de las estaciones que forman parte de la red del OH-UNAM funcionan de manera autónoma y operan del mismo modo, se componen de (1) un disdrómetro óptico láser o un pluviómetro de pesaje, (2) un gabinete que contiene en su interior una batería de plomo (28 amp/h), una microcomputadora Raspberry Pi3 con un dispositivo de banda ancha móvil, un panel solar de 60 de watt que garantiza el suministro interrumpido de energía para el sensor y el sistema de adquisición de datos (Pedrozo-Acuña et al., 2017).

La Figura 2 muestra también la arquitectura del sistema desarrollado por el Observatorio Hidrológico-UNAM. Sus principales funciones son la adquisición, transmisión y publicación de datos en tiempo real. La información adquirida por el disdrómetro se almacena en una tarjeta tipo SD (Secure Digital) y la computadora Raspberry Pi3 envía la información a la nube usando la banda ancha móvil a través de la red 4G de telefonía celular. Esta operación se realiza minuto a minuto por medio de programas de cómputo propios, escritos en lenguaje de programación Python, que administran la información (Pedrozo-Acuña et al., 2017).

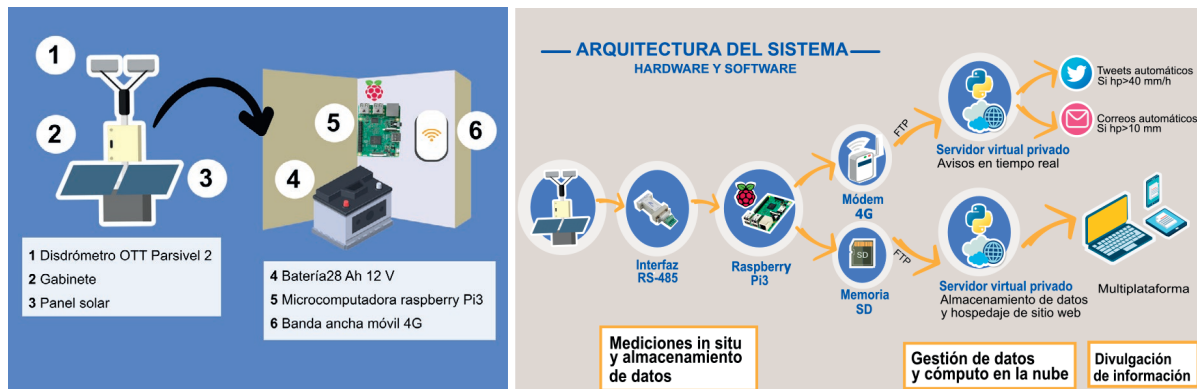


Figura 2 | Panel izquierdo: Principales componentes de una estación del Observatorio Hidrológico de la UNAM. Panel derecho: Arquitectura del sistema.

Por su parte, las estaciones del SACMEX utilizan pluviómetros de balancín (PB), modelo TB3 de la marca HyQuest Solutions, con un nivel de precisión de $\pm 2\%$ de 0 a 250 mm/h y con resolución de 0.01 pulgadas e intervalos de medición de 0 a 700 mm/h. Su funcionamiento consiste en conducir el agua de lluvia al compartimento superior mediante un embudo. Una vez que se recolectan 0.254 milímetros, la cubeta pierde estabilidad y se balancea hacia la otra posición de reposo, este movimiento acciona un circuito eléctrico que produce un registro (pulso) con trazos discontinuos (panel izquierdo de la Figura 3).

Para el presente estudio se seleccionaron nueve estaciones con disdrómetros ópticos láser (DOL), los cuales pertenecen a la segunda generación Parsivel manufacturada por OTT. Este tipo de disdrómetro mide la sombra que generan las partículas precipitadas cuando pasan por el haz láser (panel derecho, Figura 3), las partículas son subdivididas en 32 clases de diámetros y 32 velocidades (1024 clases en total), a partir de estas mediciones se estima la cantidad de precipitación, intensidad, condiciones

de visibilidad, la energía cinética y la reflectividad. La superficie de medición de la banda láser es de 54 cm², además es capaz de identificar los tipos de precipitación, para partícula de precipitación líquida tiene un rango de medición de 0.2 a 5 mm y en partícula sólida de 0.2 a 25 mm, la velocidad de partícula de 0.2 a 20 m/s, la intensidad de lluvia es de 0.001 a 1200 mm/h, con un nivel de precisión $\pm 5\%$ (precipitación líquida) y $\pm 20\%$ (sólida) (OTT, 2016).

Dado que el principio de funcionamiento del pluviómetro de balancín es diferente al del disdrómetro óptico láser, para equiparar las mediciones entre ambos sensores las estimaciones de lluvia derivadas del disdrómetro se evalúan en términos de acumulaciones anuales y de la acumulación de precipitación de los eventos.



Figura 3 | Las redes de medición comparadas utilizan pluviómetros de balancín (a la izquierda) y disdrómetros ópticos láser (derecha) (Elaboración propia con base en las figuras de los manuales de los fabricantes (HyQuestSolutions, 2022) y (OTT, 2016).

Es importante destacar que el Observatorio Hidrológico de la UNAM tiene la filosofía de datos abiertos; proporciona alertas en tiempo real a la ciudadanía, envía información de eventos extremos a instituciones y tomadores de decisiones relacionados con la infraestructura urbana, además, brinda la posibilidad de descargar datos históricos para diversos estudios, desde ciencia básica hasta ingeniería aplicada. La base de datos del Observatorio Hidrológico (OH-UNAM, 2022) está disponible para la descarga en formato.xls en su sitio web con datos mensuales y agregación temporal de 1 minuto.

Si bien, las estaciones pluviométricas de SACMEX son capaces de transmitir la información en tiempo real, los datos subsidiarios deben solicitarse al área correspondiente, exponiendo los motivos por los cuales se solicitan, aunado a que los registros están disponibles 2 o 3 meses después de un periodo de recolección de las estaciones. Los datos disponibles son publicados por la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México, mediante un boletín hidrometeorológico diario (SPC, 2022), con datos de precipitación en 24 horas con la información obtenida de las estaciones SACMEX y OH-IIUNAM.

MÉTODOS

La red del OH-IIUNAM está constituida por 55 estaciones pluviométricas y 5 estaciones piezométricas. En las estaciones pluviométricas OH-UNAM se cuenta con dos tipos de sensores: 16 estaciones tienen pluviógrafos de pesaje (OTT Pluvio² S) y 39 estaciones cuentan con disdrómetros ópticos laser (OTT Parsivel²). En el panel izquierdo de la Figura 4 se indica con círculos rojos las estaciones del OH-UNAM y en color azul las estaciones SACMEX. Se seleccionaron nueve estaciones y al menos una estación del SACMEX a tres kilómetros de radio, en total 16 estaciones (Ver panel derecho de la Figura 4). La base de datos incluye los registros de precipitación desde enero de 2017 a diciembre de 2019. Para fines prácticos, cuando las estaciones automáticas se ubican a una distancia menor o igual a 100 metros, se consideran que están en el mismo lugar (Morbideilli et al., 2020).

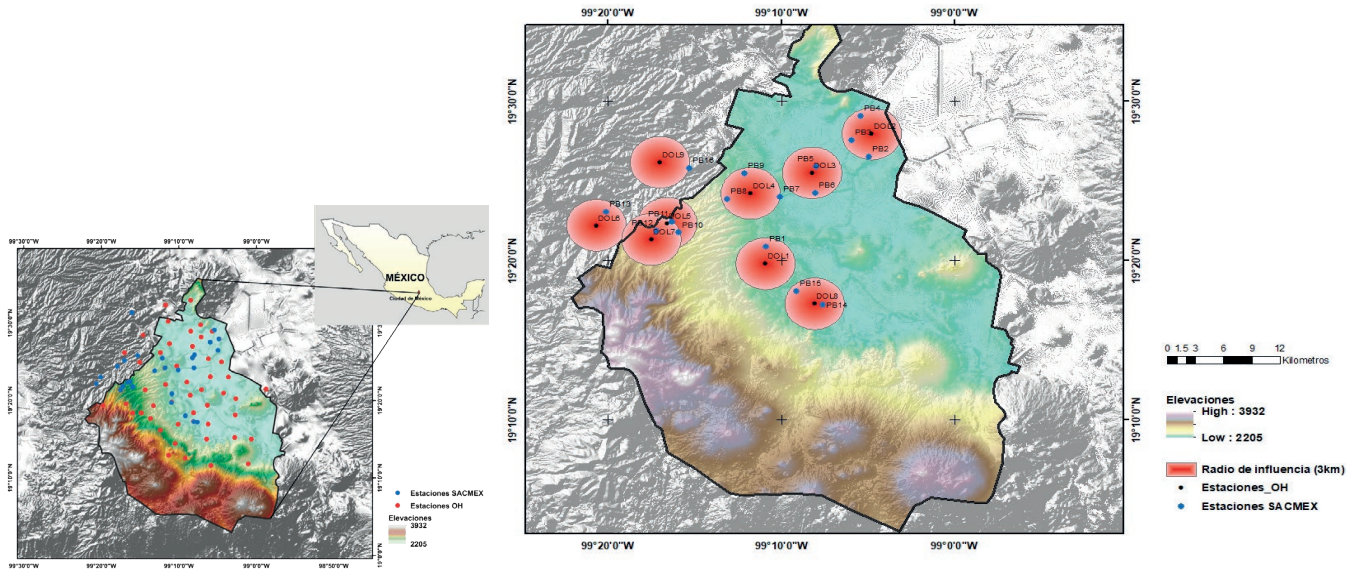


Figura 4 | Panel derecho: red de estaciones pluviométricas del Observatorio Hidrológico de la UNAM (rojo) y SACMEX (azul). Panel izquierdo: selección de las 9 estaciones con disdrómetros ópticos láser (DOL) y las 16 estaciones con pluviómetro de balancín (PB) SACMEX adyacentes (en un radio de 3 km).

En la Tabla 1 se muestran las nueve estaciones con disdrómetros ópticos láser (DOL) del OH-UNAM y los correspondientes pluviómetros de balancín (PB) de la red de estaciones de SACMEX con los que se comparan.

Tabla 1 | Distancias entre la estación pluviométrica OH-UNAM de referencia y la estación SACMEX comparada.

Estación DOL	Altitud (msnm)	Estación PB	Distancia (km)	Localización
DOL1	2 291	PB1	2.1	sur
		PB2	2.72	norte
DOL2	2 230	PB3	2.16	norte
		PB4	2.35	norte
DOL3	2 232	PB5	0.85	centro
		PB6	2.4	centro
DOL4	2 300	PB7	2.98	oeste
		PB8	2.42	oeste
		PB9	2.4	oeste
DOL5	2 630	PB10	1.57	oeste
		PB11	0.56	oeste
DOL6	2 639	PB12	1.46	oeste
		PB13	2	oeste
DOL7	2 731	PB10	1	oeste
DOL8	2 242	PB14	0.8	sur
		PB15	2.28	sur
DOL9	2 147	PB16	3	oeste

Análisis general de la precipitación total:

Los datos de precipitación del SACMEX proceden de dos fuentes diferentes, y por tanto no tienen el mismo formato: (1) resúmenes diarios que contienen un conjunto de datos corregidos y recuperados (agregación temporal de 24 horas) y (2) datos crudos descargados directamente del pluviómetro de balancín (incluso en alta agregación temporal de 1 minuto).

Los datos diarios de precipitación de las estaciones SACMEX se utilizan en el análisis general, agregados hasta formar una serie de 36 meses, de enero de 2017 a diciembre de 2019. Los datos entre ambas estaciones se hicieron coincidir, pero en caso de que una estación no tuviera información, la fecha y hora correspondiente no se consideraría para ambas estaciones.

Por otro lado, los datos crudos se utilizaron directamente en la comparación de eventos de tormenta, asegurando que la fecha y la hora coincidieran de acuerdo con los eventos observados por las estaciones OH-UNAM. En algunos eventos, la hora de ocurrencia no coincidía con exactitud por una diferencia de minutos. A partir de los hietogramas de las estaciones OH-UNAM y SACMEX con una forma similar y un ligero desfase en tiempo (minutos), se consideró que se trataba del mismo evento.

Análisis individual de los eventos:

Cuando la precipitación cae como una tormenta de forma discreta, aislada de otras tormentas, se conoce como un evento. Cabe señalar que, para los eventos, no se ha definido con precisión una escala de tiempo, porque éste puede variar en un rango de minutos a días (Woods, 2005). Con base en el trabajo de Tokay (Tokay et al., 2013), en este trabajo se ha definido un evento como la acumulación mínima de 1 mm y una separación entre los eventos de al menos 1 hora. Además, para el caso del disdrómetro, el evento debe contener al menos 10 gotas. En el caso del pluviómetro de balancín, se consideró un evento cuando al menos se registraron cuatro conteos de pulsos consecutivos.

Métricas de evaluación

Cada una de las métricas que a continuación se presentan se utilizó para la evaluación de las estaciones pluviométricas, el error porcentual se aplicó para cuantificar la precipitación acumulada durante el periodo de 36 meses (análisis general), que solo proporciona un valor por estación, sea disdrómetro óptico láser o pluviómetro de balancín. La primera métrica es el error porcentual (E%), que se puede obtener fácilmente mediante la Ecuación (1), los disdrómetros se representan con R_O (OH-UNAM) y los pluviómetros de balancín R_S (SACMEX). Donde R_O es el valor de referencia.

$$E\% = \frac{R_S - R_O}{R_O} \cdot 100 \quad (1)$$

Posteriormente al proceso de selección de eventos, se generaron diagramas de dispersión para el análisis de las diferencias entre todos los eventos. Después, se calculó el error absoluto medio (EAM), la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el coeficiente de determinación (R^2).

En el análisis se utilizó el error absoluto medio (EAM), el cual mide la diferencia entre las mediciones calculadas por los pluviómetros de balancín (R_S) y las observadas por el disdrómetro óptico láser (R_O), relativas a un mismo fenómeno, en este caso la precipitación. En la estimación del error absoluto todas las diferencias individuales se ponderan por igual en el promedio. En la Ecuación (2) se indica su cálculo:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_o - R_s| \quad (2)$$

La segunda métrica más utilizada para evaluar la regresión lineal es la raíz del error cuadrático medio (RECM), expresada en la Ecuación (3), que consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. Es un criterio muy útil porque permite identificar las mediciones con error, al aumentar y penalizar los errores de mayor magnitud. Tanto para el error absoluto medio (EAM), como para la raíz del error cuadrático medio (RECM), se obtienen mejores resultados si los valores son bajos y cercanos al cero. El RECM es comúnmente utilizado en climatología, pronóstico y análisis de regresión para comprobar resultados experimentales.

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_o - R_s)^2} \quad (3)$$

El coeficiente de determinación (R^2), se ha utilizado para medir la cercanía de cada punto de los datos respecto a la línea de regresión, R^2 se calcula como se muestra en la Ecuación 4. Está limitado entre 0 y 1, cuanto mayor es su valor la línea atraviesa un mayor porcentaje de puntos

$$R^2 = \left(\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n R_o \cdot R_s - \sum_{i=1}^n R_o \cdot \sum_{i=1}^n R_s}{\sqrt{\left(n \cdot \sum_{i=1}^n R_o^2 - \left(\sum_{i=1}^n R_o \right)^2 \right) \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^n R_s^2 - \left(\sum_{i=1}^n R_s \right)^2 \right)}} \right)^2 \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis general de precipitación total:

En el análisis general de la precipitación se estimaron las curvas masa en un periodo de 36 meses, en la Figura 5 cada gráfica representa una comparación entre una estación con un disdrómetro óptico láser (DOL) y al menos una estación con pluviómetro de balancín (PB), situadas dentro de un radio de 3 kilómetros. Las gráficas se han ordenado de mayor a menor precipitación acumulada, identificadas por las regiones donde se localizan; la región oeste se señala en tonalidad azul, en la cual concurren 5 estaciones con disdrómetros ópticos láser (DOL6, DOL5, DOL7, DOL9 y DOL4) y 9 estaciones con pluviómetros de balancín (PB13, PB12 comparada con dos disdrómetros, PB10, PB11, PB16, PB9, PB8 y PB7), la región centro se señala en color amarillo con una sola estación con disdrómetro (DOL3) y dos pluviómetros de balancín (PB6 y PB5), la región sur, en color rojo, dispone de dos disdrómetros (DOL8 y DOL1) y tres pluviómetros de balancín (PB15, PB14 y PB1), finalmente la región norte, señalada en color verde, está constituida por una estación de disdrómetro (DOL2) y tres pluviómetros de balancín (PB3, PB4 y PB2).

Como se mostró en el mapa de isoyetas de la Figura 1, existen diferencias en la distribución de la precipitación de unas regiones a otras en la Ciudad de México, definidas principalmente por la fisiografía de la sierra y el valle, la primera se localiza al oeste, extendiéndose al sureste, mientras que el valle se abre del centro hacia el este de la ciudad. En las primeras 4 gráficas se registraron importantes acumulaciones de más de 2400 mm, tomando en cuenta que el promedio anual es ≈ 600 mm, las cuales se localizan al oeste de la ciudad, y solo una comparación, situada en la región centro, que mantienen una aceptable correspondencia entre el DOL3 y PB5, pero sugiere una sobrestimación del pluviómetro PB6. Cabe destacar que en la primera gráfica se distingue que el disdrómetro DOL6 ha subestimado considerablemente (casi la mitad de precipitación 1467 mm) las mediciones del PB13 (3340 mm), este primer hallazgo sugiere una falla en el disdrómetro DOL6, es muy probable que se deba a un error de transmisión, debido a que la estación se encuentra enclavada en la Sierra de las Cruces, que forma parte del eje Neovolcánico Transversal.

En cuanto a los valores intermedios de precipitación acumulada (alrededor de 2400 mm) no se encuentran categorizadas para una región en específico de la ciudad. En la región sur de la Ciudad de México se muestra correspondencia entre DOL3 y los pluviómetros PB14 y PB15, de manera similar en la región oeste las curvas entre DOL4 y los pluviómetros PB7, PB8 y PB9 se encuentran próximas.

Respecto a los valores más bajos de precipitación registrados (≈ 2000 mm) se refieren a las dos últimas gráficas, la comparación entre DOL1 y PB1 muestra que son muy parecidas, incluso en los primeros meses las curvas se superponen. Finalmente, la gráfica que corresponde a la región norte, identificada como la zona donde llueve menos, los valores medidos entre los pluviómetros de balancín PB3 y PB4 se superponen en todo el periodo de observación, sin embargo, las mediciones entre el disdrómetro DOL2 y PB2 que se traslapan entre ellas, pero son inferiores respecto a PB3 y PB4. En general, las estaciones con pluviómetros de balancín han registrado valores más altos que las estaciones con disdrómetros ópticos láser, esto se atribuye a una sobre estimación por parte de los pluviómetros de balancín de eventos menores, que son más frecuentes durante el año, mientras que los eventos extremos son mejor representados por el disdrómetro y se caracterizan por ocurrir mayormente durante la temporada de verano.

Para evaluar el efecto de la distancia entre las estaciones con disdrómetro y las estaciones con pluviómetro, durante el periodo de 36 meses, primero se estimó el error porcentual entre la precipitación acumulada de la estación PB respecto a la estación

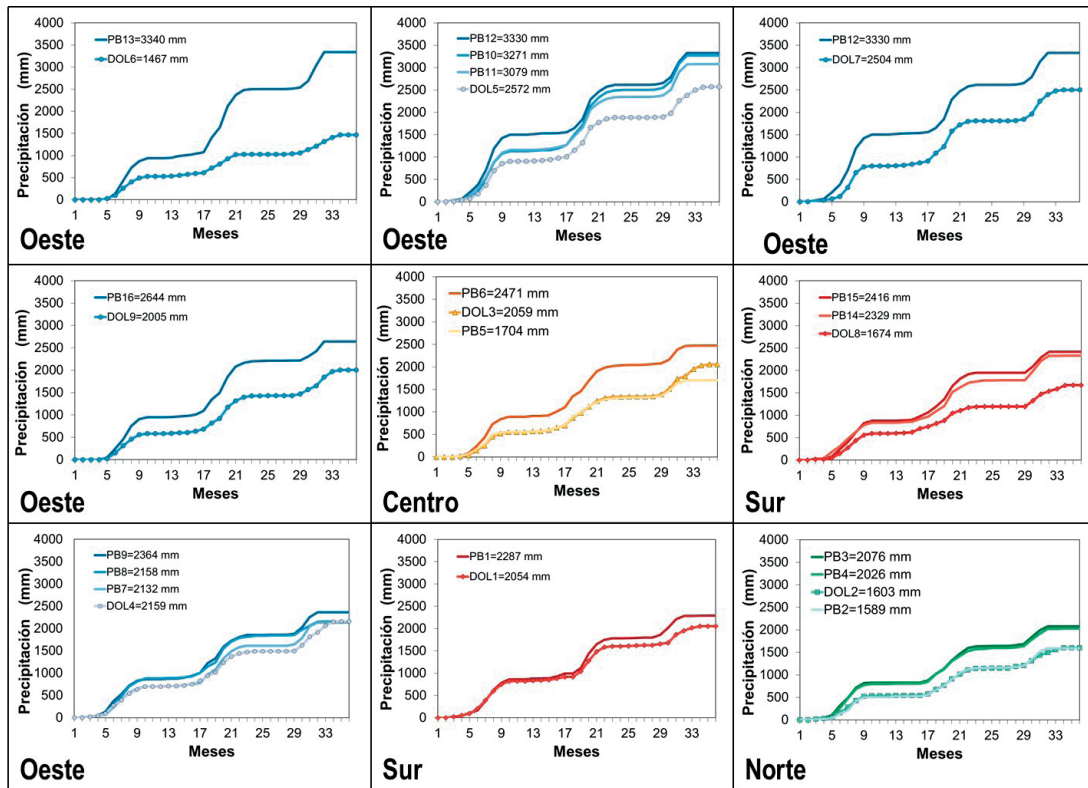


Figura 5 | Precipitación acumulada durante 36 meses.

de referencia LOD y, posteriormente, se comparó el error respecto a la distancia como se indica en la Figura 6. No obstante, se considera que la tendencia es positiva pero ligeramente ascendente, el coeficiente de determinación es bajo ($R^2=0.38$), solo algunas estaciones se ajustan a la recta, son aquellas que se encuentran a una distancia entre 2 y 2.5 km. En estas gráficas destaca el círculo azul más alejado de la distribución, corresponde a la medición entre la estación del disdrómetro DOL6 y el pluviómetro de balancín PB13, con un error de 127.6%. Asimismo, se categorizó la información de cada región de la Ciudad de México para determinar

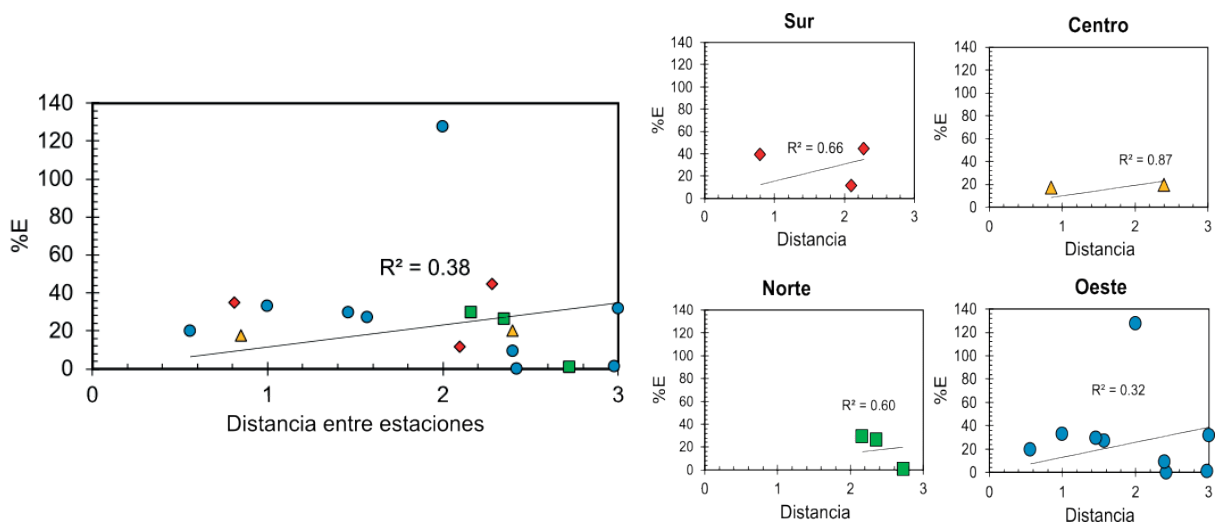


Figura 6 | Gráfica de dispersión del error porcentual y distancia entre las estaciones de DOL y PB con datos mensuales de precipitación por regiones de la Ciudad de México.

cuál dispone de mejores mediciones. En la región centro se obtuvo un coeficiente $R^2=0.87$, en la región sur $R^2=0.66$, en el norte de la ciudad $R^2=0.60$ y la región oeste, que dispone de más estaciones, se obtuvo $R^2=0.32$, evidentemente el error de 127.6% y las estaciones con distancia ≥ 2.5 km, con bajo error, afectaron en la estimación del coeficiente.

Cada instrumento posee características propias como la resolución, el rango de mediciones, el principio de medición, entre otras, que influyen en las estimaciones de la precipitación. Además de estas características específicas, se deben considerar aspectos técnicos como el mantenimiento de las estaciones y el rescate de información, así como factores de carácter ambiental.

Análisis individual de los eventos

La estimación de la intensidad instantánea de lluvia tiene una importante variabilidad espacial y temporal, especialmente en eventos extremos se dificulta la medición satisfactoria. Se necesitan redes de medición densas para capturar la variabilidad, con equipos de alta resolución temporal, como el disdrómetro, que adquiere la información cada minuto. Como se ilustra en la Figura 7, la comparación entre el disdrómetro (DOL5) y el pluviómetro de balancín (PB12) del evento ocurrido el día 20 de agosto de 2018, en el cual PB12 registra algunos puntos, solo tiene coincidencia en el momento del pico máximo del evento, en general, se ha encontrado que en las mediciones de eventos extremos (≥ 20 mm) de lluvia intensa los pluviómetros de balancín subestiman la intensidad de eventos extremos obtenida por los disdrómetros. Se observa una mayor diferencia en la intensidad instantánea asociada a una precipitación convectiva, que si se compararan registros correspondientes a un evento de lluvia estratiforme.

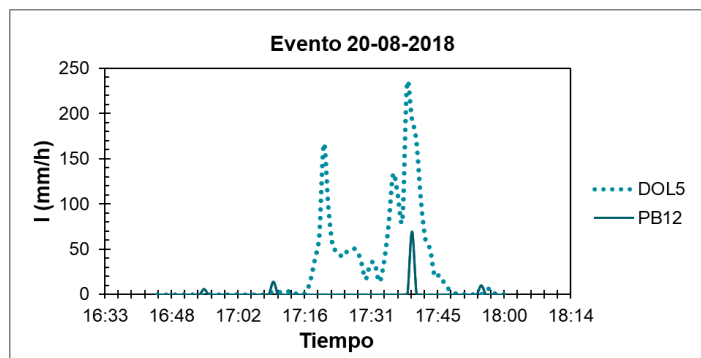


Figura 7 | Hietograma de intensidad para un evento ocurrido el 20 de agosto de 2018.

La Figura 8 presenta los coeficientes de determinación obtenidos a partir de la correlación lineal de 2599 eventos medidos por los disdrómetros y los pluviómetros de balancín en el periodo 2017-2019. Los intervalos del coeficiente de determinación se indican en el mapa con círculos rojos y su tamaño varía con su valor. Se establecieron cinco intervalos, los valores mínimos se representan con el círculo más pequeño ($R^2 \leq 0.52$), con círculos medianos se indican los valores intermedios ($0.53 \leq R^2 \leq 0.65$ y $0.66 \leq R^2 \leq 0.69$) y los valores máximos se ilustran con los círculos más grandes ($0.70 \leq R^2 \leq 0.72$ y $0.73 \leq R^2 \leq 0.77$). Para la generación de los intervalos del coeficiente de determinación se calculó el promedio aritmético de los valores de R^2 de las estaciones con pluviómetro de balancín próximas a la estación con disdrómetro que se han incluido en la Tabla 2, además del error absoluto medio (EAM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM). Por ejemplo, el valor que se expresa en el círculo DOL2 de la Figura 8, es el promedio de entre PB4, PB3 y PB2. En este análisis por eventos es posible confirmar la falla de transmisión del disdrómetro DOL6 que se reveló en las Figuras 5 y 6, cuyo coeficiente de correlación es $R^2=0.517$.

Sin embargo, el sesgo de las mediciones de los pluviómetros de balancín respecto al disdrómetro DOL8 no resulta tan evidente en el mapa, al verificar en la Tabla 2 la correlación es alta entre DOL8 y PB14 donde $R^2=0.770$ y, por otro lado, la correlación entre DOL8 y PB15 es la más baja $R^2=0.336$, con solo sólo 69 eventos en común, debido a esta amplia diferencia se atribuye que la falla proviene del pluviómetro de balancín PB15. Cabe recordar que en el análisis de eventos individuales se han utilizado los datos brutos, que pueden estar incompletos, y posteriormente ser restaurados o procesados, como se verificó en el análisis general (Figura 5), en la cual las diferencias entre las mediciones fueron moderadas.

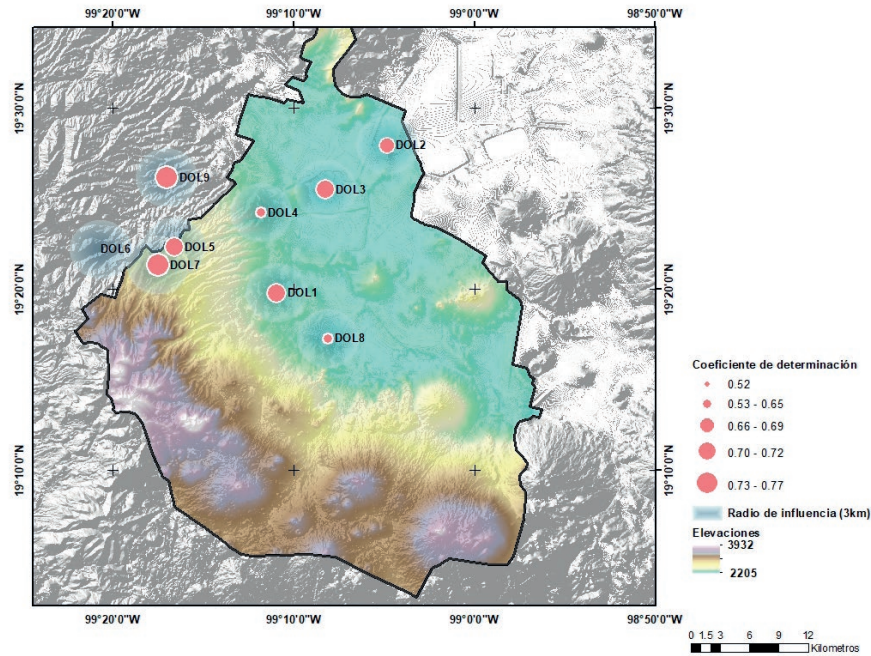


Figura 8 | Correlación lineal de eventos de precipitación entre las estaciones DOL y PB.

Se observó que el rango de valores de error absoluto medio (EAM) estimados se encuentran entre 2.13 y 3.92. En cambio, los valores de la raíz de error cuadrático medio RECM se encuentran en un rango de 4.078 y 5.795, excepto en dos comparaciones; la primera, entre DOL2 y PB2, que se asciende a 32.685 y en la segunda, de DOL8 y PB15, donde RECM=7.46.

Tabla 2 | Estadísticos coeficiente de determinación R², error absoluto medio EAM y raíz de error cuadrático medio RECM al comparar una estación con disdrómetro óptico láser (DOL) y una estación con pluviómetro de balancín (PB).

Estación DOL	Estación PB	R2	EAM	RECM
DOL1	PB1	0.71	2.95	4.72
DOL2	PB2	0.69	3.77	32.69
	PB3	0.68	3.27	5.10
	PB4	0.65	3.47	5.35
DOL3	PB5	0.76	2.13	4.14
	PB6	0.66	2.89	5.09
DOL4	PB7	0.51	3.56	5.38
	PB8	0.66	2.91	4.48
	PB9	0.67	2.64	4.08
DOL5	PB10	0.69	3.56	5.48
	PB11	0.75	2.72	4.88
	PB12	0.69	3.58	5.58
DOL6	PB13	0.52	3.62	6.22
DOL7	PB12	0.76	3.04	4.85
DOL8	PB14	0.77	3.06	5.80
	PB15	0.34	3.99	7.46
DOL9	PB16	0.72	3.11	4.88

Se observa que los factores que influyen más en el grado de correlación de las mediciones son la distancia y el número de eventos, por ello, se han analizado por separado estos factores. En la Figura 9 se muestran las gráficas de la distancia, a la izquierda, y el tamaño de la muestra, a la derecha, respecto al valor del coeficiente R^2 . Los resultados reflejan que, en comparaciones con más de 150 eventos en común ($N \geq 150$), predominan valores de R^2 cercanos a 0.7, esto podría indicarnos cierta influencia en la correlación, excepto en dos casos; DOL4 y PB9, que registraron 143 eventos y se obtuvo una correlación baja con un $R^2=0.668$, y DOL4 y PB7, con 140 eventos con $R^2=0.514$. Para evaluar la influencia del número de eventos se estimó para el conjunto de datos el coeficiente de determinación y se obtuvo $R^2=0.60$, con una tendencia positiva, lo que indica que a mayor número de evento aumenta la correlación lineal.

Por otro lado, se analizó el efecto de la distancia entre las estaciones con el valor del coeficiente de determinación, el resultado es $R^2=-0.47$, esta tendencia negativa significa que a medida que la distancia entre las estaciones disminuye y el valor de la correlación aumenta. La obtención del coeficiente de determinación, el número de eventos en común medidos por ambos sensores de precipitación tiene mayor influencia que la distancia entre las estaciones. Aunque la correlación de la distancia es negativa, no se debe despreciar, ya que también influye moderadamente.

En general, los resultados de la Figura 9 del panel derecho confirma que el número de eventos refleja la consistencia de sincronización de los sensores en fecha y hora y por tanto se obtiene alto grado de correlación del R^2 . Por otro lado, el panel izquierdo muestra que, si la distancia entre la estación del disdrómetro y la estación pluviómetro de balancín es más corta, el valor alto R^2 indica que la medición de la precipitación es más consistente.

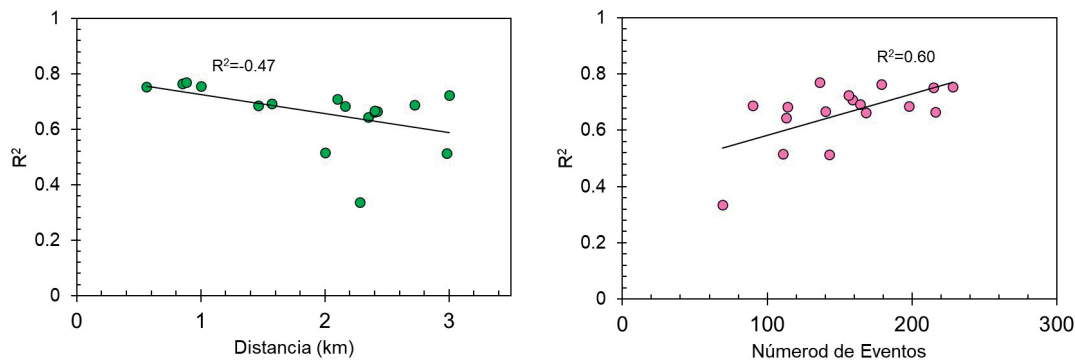


Figura 9 | Efectos de la distancia y el número de eventos en las correlaciones.

El proceso de evaluación mostrado tiene la limitación que solo permiten detectar errores de tipo sistemático, los cuales están relacionados con el desempeño de los instrumentos de medición (sobreestimación o subestimación de la precipitación real en un rango aceptable de los sensores cercanos). Por otro lado, solo verificando evento por evento se podría inducir cuáles son los errores de tipo aleatorios, provocados por fluctuaciones desconocidas e impredecibles que afectan los valores en una medición dada. Desafortunadamente, no es posible comparar las mediciones de los disdrómetros y los pluviómetros de balancín de manera simultánea y en el mismo lugar para clasificar el tipo de error, solo se puede inferir.

CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo es evaluar las mediciones de las redes pluviométricas más importantes de la Ciudad de México, para 16 estaciones que utilizan pluviómetros de balancín del Sistema de Aguas de la Ciudad de México y 9 estaciones con disdrómetros ópticos láser del Observatorio Hidrológico, el estudio se acotó en un periodo de tres años. Uno de los retos principales del Observatorio Hidrológico de la UNAM es contar con sensores de medición confiables y una red que utiliza las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) para el monitoreo continuo del agua superficial y subterránea, que permitan una toma de decisiones informada en el corto plazo. Por otro lado, busca aportar datos confiables que apoyen investigaciones en torno al manejo

urbano del agua, para mejorar el entendimiento del ciclo hidrológico urbano con observaciones más detalladas, con alta resolución temporal (1 minuto), que podrían implementarse en la validación de modelos hidrológicos. Asimismo, su aprovechamiento para la calibración de tecnologías y métodos indirectos para la medición de la lluvia, como los radares meteorológicos disponibles en la Zona Metropolitana del Valle de México. Actualmente se cuenta con dos radares meteorológicos: Cerro Catedral, propiedad del Servicio Meteorológico Nacional, y Cerro de la Estrella, que pertenece al Gobierno de la Ciudad de México.

A partir del análisis general se estableció que las estaciones con pluviómetros de balancín registraron mayor cantidad de precipitación acumulada que las estaciones con disdrómetro óptico láser. El error, en términos de porcentaje, indica que las tres comparaciones con mayor aproximación en la medición corresponden a las estaciones DOL2 y PB2 (%E=0.86), DOL4 y PB8 (%E=0.072) y DOL4 y PB7 (%E=1.254), si los datos de la precipitación de estas estaciones faltasen un día, se pueden completar con la estación comparada, ya que sus mediciones no difieren entre ellos más de un 10%. Finalmente, con una variación más amplia de error porcentual se hallaron las estaciones DOL8 y PB15 (%E=44.36%) y DOL6 y PB13(%E=127.63%). De esta última comparación, se infiere que la falta de mediciones en la estación PB13 se atribuye a problemas en la transmisión de datos, debido a que la estación se ubica en una zona montañosa. En términos generales, el valor promedio de error porcentual entre las redes de disdrómetro óptico láser y el pluviómetro de pesaje es del 27.57%.

El análisis de eventos individuales reveló, que las estaciones con pluviómetro de balancín (PB) funcionan adecuadamente para eventos de lluvia de larga duración, con resultados similares a las mediciones de los disdrómetros ópticos láser (DOL). No obstante, con estricto apego a la definición de evento, con una acumulación mínima de 1 mm y al menos cuatro pulsos consecutivos en estaciones con PB, durante la revisión de datos crudos se identificó que, en eventos de corta duración y fuerte intensidad, en varios casos se contabilizaron menos de cuatro pulsos, por tanto, se excluyeron como eventos. En efecto, es una limitación del pluviómetro de balancín no poder registrar la variación temporal detallada. De modo que los eventos de estaciones con LOD registran adecuadamente eventos de tipo convectivo.

En términos porcentuales, estas comparaciones indican que la mayoría de las mediciones (más de la mitad), entre las estaciones disdrómetros ópticos láser y los pluviómetros de balancín, tienen una correlación moderada. Con base en los coeficientes de correlación, las mejores mediciones provienen de las comparaciones situadas a una distancia menor o igual a 1 km; en el caso de DOL8 y PB14 ($R^2=0.77$), entre ellas la distancia es de 0.88 km, DOL3 y PB5 ($R^2=0.76$) se ubican a una distancia de 0.85 km, DOL7 y PB12 ($R^2=0.76$), cuya separación es 1 km, y las estaciones DOL5 y PB11 ($R^2=0.75$), cuya distancia es la más corta (0.56 km). Por otro lado, los coeficientes de correlación más bajos corresponden a la relación de DOL6 y PB13 ($R^2=0.52$), en este caso se concluyó que podría existir un problema de transmisión de datos con la estación del Observatorio Hidrológico, que se sitúa en una zona montañosa. Por último, la correlación más divergente se ubica entre DOL8 y PB15 ($R^2=0.34$), posiblemente derivada de una falla en la transmisión propia de la estación del pluviómetro SACMEX.

En cuanto al error absoluto medio no existen diferencias sustanciales. Por su parte la estimación de la raíz del error cuadrático medio mostró que los valores atípicos tienen mayor influencia sobre los valores de eventos individuales, en general los valores fluctúan entre 4 y 5. Los valores más altos de RECM corresponden a DOL2 y PB2 (RECM=32.69), seguido por DOL8 y PB15 (RECM=7.46).

Finalmente, en el análisis de la influencia de las variables distancia y números de eventos registrados entre los pluviómetros de balancín y los disdrómetro óptico láser, se estableció que ambas variables tienen efecto en las comparaciones, la distancia de tipo negativo ($R^2=-0.47$) y el número de eventos con correlación positiva y mayor efecto ($R^2=0.60$).

El control de calidad de los datos registrados es el último eslabón de la cadena que asegura una información básica confiable, además del mantenimiento remoto que permita el funcionamiento y transmisión de los datos. Se propone establecer un acuerdo entre instituciones Observatorio Hidrológico UNAM y dependencias del gobierno como el Sistema de Aguas de la Ciudad de México que facilite el intercambio de información (con tiempos más cortos de entrega) con el objetivo de planificar la evaluación de la información previo al inicio de la temporada de lluvias. Se recomienda que la comparación se realice con los datos en crudo de los pluviómetros de balancín, para detectar errores sistemáticos, que de otra manera no podrían realizarse.

En un futuro, con base en la evaluación de mayor número de estaciones pluviométricas y con un periodo más largo de observación, podrían sentarse las bases para elaborar un manual de buenas prácticas en la medición de la precipitación de la Zona

Metropolitana del Valle de México, debido a que aspectos como la resolución temporal de las mediciones, la densidad, la distancia y los protocolos de transmisión en tiempo real de las estaciones no están plateadas hoy en día en la gestión de cuencas urbanas de México.

AGRADECIMIENTOS

La autora principal del artículo agradece el apoyo económico recibido por parte del programa de becas de posgrados del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. También agradece el apoyo del Instituto de Ingeniería de la UNAM y de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México.

Por último, gracias a todos los colegas del Observatorio Hidrológico de la UNAM.

REFERENCIAS

- Behrangi, A., Khakbaz, B., Jaw, T.C., AghaKouchak, A., Hsu, K., Sorooshian, S. (2011). Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *Journal of Hydrology*, 397(3–4), 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.043>
- CONABIO. (2022). *Portal de Geoinformación 2022. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)* <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis>
- CONAGUA. (2021). *Información de estaciones climatológicas de 1950 a 2010*. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/estaciones-climatologicas>
- Deltares. (2016). *Towards a Water Sensitive Mexico City*. 108.
- Espínola, E.M.S.B. van de P. R. (2016). *Towards a Water Sensitive Mexico City*. https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2018/10/27-Water-Sensitive-Elwood_FINAL.pdf
- HyQuestSolutions. (2022). *HyQuest Solutions*. <https://www.hyquestsolutions.com.au/products/hardware/meteorology/tb3-tipping-bucket-rain-gauge>
- Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. In *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (Vol. 31).
- Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821–3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G.J., Muller, C.L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D.B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69–78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>
- Langbein, W. (1965). National networks of hydrological data. *Symposium on Design of Hydrological Networks*, 5–150.
- Magana, V., Pérez, J., Méndez, M. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional*, 42(2), 247–259. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.2.269>
- McMillan, H., Jackson, B., Clark, M., Kavetski, D., Woods, R. (2011). Rainfall uncertainty in hydrological modelling: An evaluation of multiplicative error models. *Journal of Hydrology*, 400(1–2), 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.026>
- Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Picciafuoco, T., Corradini, C., Casas-Castillo, M.C., Fowler, H.J., Wilkinson, S.M. (2017). Effect of temporal aggregation on the estimate of annual maximum rainfall depths for the design of hydraulic infrastructure systems. *Journal of Hydrology*, 554, 710–720. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.050>

- Morbidelli, R., García-Marín, A.P., Mamun, A. Al, Atiqur, R.M., Ayuso-Muñoz, J.L., Taouti, M.B., Baranowski, P., Bellocchi, G., Sangüesa-Pool, C., Bennett, B., Oyunmunkh, B., Bonaccorso, B., Brocca, L., Caloiero, T., Caporali, E., Caracciolo, D., Casas-Castillo, M.C., Catalini, C.G., Chettih, M., ... Saltalippi, C. (2020). The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas. *Journal of Hydrology*, 590(June), 125258. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125258>
- Moss, M., Gilroy, E., Tasker, G., Karlinger, M. (1982). Design of surface-water data networks for regional information. U.S.G.S. *Water Supply Paper*, 2178.
- NMX-AA-116/2-SCFI-2015, 1 (2015). <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx>.
- OH-UNAM. (2022). *Observatorio Hidrológico de la UNAM*. <https://www.oh-iunam.mx/>
- Oke, T.R., Zeuner, G., Jauregui, E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(4), 433–444. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90050-3)
- OMM, Organización Mundial de Meteorología. (2017). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos OMM N°8* (O. M. de Meteorología (ed.); 8th ed.). <https://public.wmo.int/es/recursos/meteoterm>
- OTT, H. G. (2016). *Operating instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2. 52*. <https://www.ott.com/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott-parsivel2-without-screen-heating/>
- Pedrozo-Acuña, A. (2017). *Informe FINAL-Agua Inteligente. Implementación del sistema de monitoreo de lluvia en tiempo-real en CDMX*.
- Pedrozo-Acuña, A., Magos-Hernández, J.A., Sánchez-Peralta, J.A., Amaro-Loza, A., Breña-Naranjo, J.A. (2017). Real-time and discrete precipitation monitoring in Mexico city: implementation and application. In IAHR (Ed.), *HydroSenSoft, International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software* (pp. 1–7).
- Perló-Cohen, M., Zamora-Saenz, I. (2019). El estudio del agua en México. Nuevas perspectivas teórico-metodológicas. In I. de I. Sociales & U. N. A. de M. México (Eds.), *Agua y Territorio*, (15). <https://doi.org/10.17561/at.15.5042>
- SACMEX, Sistemas de Aguas de la Ciudad de México. (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México: pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. In *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. http://laopiniondelaciudad.mx/wp-content/uploads/2016/02/ElGranRetodelAgua_enla_CiudadMexico.pdf
- SPC. (2022). *Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil*. <https://proteccioncivil.cdmx.gob.mx/boletin>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., Hsu, K.L. (2018). A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Tokay, A., Petersen, W.A., Gatlin, P., Wingo, M. (2013). Comparison of Raindrop Size Distribution Measurements by Collocated Disdrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(8), 1672–1690. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00163.1>
- UNESCO, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015*. http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf
- WMO. (2011). *Observing stations and WMO catalogue of radiosondes* (Issue 9). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9896
- Woods, R. (2005). Hydrologic Concepts of Variability and Scale. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 1995. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa002>